

DOI: 10.7667/PSPC180089

# 基于形态学梯度算法的微电网行波保护方案

薛士敏, 崔淼

(天津大学智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 针对交流微电网的故障特征和保护要求, 提出一种基于形态学梯度算法的行波保护故障选线选相方案。首先, 通过比较离散小波变换和形态学梯度算法对电流行波的提取结果, 得出形态学梯度算法能更清晰地提取行波的结论。其次, 设计适用于多种拓扑结构的微电网行波保护故障选线方案。然后, 利用三相初始电流行波及其模分量设计一种故障类型判断和故障选相方案。最后, 对行波保护的死区问题进行分析并提出相应的解决方案。利用 PSCAD/EMTDC 和 Matlab 软件进行仿真分析, 仿真结果验证了所述保护方案的正确性和可行性。

**关键词:** 微电网; 形态学梯度算法; 行波保护; 故障选线; 故障选相

## Current traveling wave based protection scheme for microgrids using morphological gradient algorithm

XUE Shimin, CUI Miao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In consideration of the fault characteristics and protection requirements of microgrids, this paper proposes a current traveling wave based protection scheme using morphological gradient algorithm that can select fault lines and phases. Firstly, compared with discrete wavelet transform algorithm and morphological gradient algorithm, it is found that morphological gradient algorithm can extract traveling wave signals more clearly. Secondly, a fault line selection scheme is designed, which applies to various network topologies of microgrids. Thirdly, a fault type identification and fault phase selection scheme based on three-phase initial current traveling waves and their modal components is proposed. Finally, the dead zone problem of travelling wave protection is analyzed and the corresponding solution is proposed. The PSCAD/EMTDC and Matlab software are used in the simulation analysis, and correctness and feasibility of the protection scheme is verified by simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577129), National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050102), and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Relay Protection Technology for Distribution Network Adaptable to High Permeability Distributed Power Supply".

**Key words:** microgrids; morphological gradient algorithm; current traveling wave based protection; fault line selection; fault phase selection

## 0 引言

微电网是由分布式电源、负荷以及储能系统等构建成的中低压配电系统, 为太阳能、风能等可再生能源以及天然气、氢气等环境友好型能源的综合

利用提供了一种有效的利用方式。但是微电网多变的运行方式、拓扑结构和分布式电源的接入及其控制策略造成传统的三段式电流保护不再适用<sup>[1]</sup>。研究适用于微电网的保护方法, 是当前继电保护技术的研究热点之一。

文献[2]提出一种微电网自适应保护方法, 但是该方法仅适用于辐射状微电网。文献[3]提出利用差动保护实现微电网保护, 但逆变型分布式电源的低电压穿越控制策略使得故障线路两端的电流相角可能为钝角, 从而造成差动保护拒动。文献[4]提

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51577129); 国家高科技发展计划项目资助(863计划)(2015AA050102); 国家电网公司科技项目资助“适应高渗透分布式电源接入的配电网继电保护技术研究”

出利用距离保护实现微电网保护,但微电网逆变型分布式电源侧的距离保护抗过渡电阻能力差,距离保护无法可靠动作<sup>[5]</sup>。同样,许多学者将遗传算法<sup>[6]</sup>、模糊决策法<sup>[7]</sup>等智能算法应用于微电网保护,这些保护方法计算较为复杂,高度依赖于能高速传输大量信息的通信网络。

故障后产生的初始电流行波不受微电网运行方式、接地方式及分布式电源控制策略的影响,可用于检测各类型短路故障,行波保护应用于微电网具有突出优势。由于微电网电压等级低、线路短、分支多、含多种分布式电源,给初始故障行波的提取带来较大困难,对电流互感器的采样频率提出较高要求,极大地增加了保护的经济成本。但是,目前互感器技术已经取得了一定突破,1 MHz 采样频率的电流互感器已得到研发和应用。目前,已有大批学者提出将行波技术应用于中压配电网故障测距<sup>[8-9]</sup>和单相接地保护<sup>[10-11]</sup>。同时已有学者提出将行波保护应用于含逆变型分布式电源的微电网中<sup>[12-13]</sup>。所以,在中压微电网中配置高频互感器并实现行波保护具有一定的发展前景。文献[12]提出了一种基于小波变换的微电网行波保护方案,但小波变换不能较为清晰地提取行波的极性信息,造成其选线方案设计复杂。文献[13]针对含逆变型分布式电源的微电网提出了一种基于数学形态学的行波保护方案,但其未能有效解决行波极性比较式保护在环状微电网中不适用的问题。所以,行波保护在微电网中的应用还需进一步探索。

本文针对中压微电网中的各类型短路故障,设计了一个基于形态学梯度算法的行波保护选线选相方案,包含以下4部分内容:通过分析比较选择更适用于行波保护的数据处理工具;计及微电网的不同网络结构和线路类型,设计故障选线方案;计及零、线模初始电流行波混叠和不混叠的情况,借助三相电流初始行波及其模分量设计故障类型判断和选相方案;分析行波保护的死区问题并提出解决方案。

## 1 离散小波变换和形态学梯度算法的比较

### 1.1 离散小波变换基本原理

离散小波变换是分析具有奇异性突变信号的有效方法,适合用来提取故障电流中的行波信息。离散小波变换的表达式如式(1)<sup>[10]</sup>。

$$\begin{cases} A_{2^j} f(n) = \sum_k h_k A_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1} k) \\ W_{2^j} f(n) = \sum_k g_k A_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1} k) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f(n)$  为需要进行分析的离散化信号序列;

$A_{2^j} f(n)$  和  $W_{2^j} f(n)$  分别为离散小波变换在尺度  $2^j$  下  $f(n)$  的近似值和小波分量;  $j (j \in Z)$  为小波分解层数;  $\{h_i\} (i \in Z)$  和  $\{g_i\} (i \in Z)$  为由小波函数确定的系数。

若在尺度  $2^j$  下点  $n_0$  满足式(2),则称  $n_0$  为该尺度下离散小波变换的模极大值点,  $W_{2^j} f(n_0)$  为小波变换的模极大值。

$$\left. \frac{\partial W_{2^j} f(n)}{\partial n} \right|_{n=n_0} = 0 \quad (2)$$

由于离散小波变换的模极大值点和信号的突变点存在对应的关系,检测电流信号小波变换结果的第一个模极大值即可实现对初始电流行波的提取。

### 1.2 形态学梯度算法基本原理

形态学梯度算法也是一种可用于提取行波信号的数据处理工具。该算法需要借助数学形态学中的两种基本运算:膨胀和腐蚀,两种运算分别如式(3)和式(4)所示<sup>[13]</sup>。

$$(f \oplus g)(n) = \max \left\{ \begin{array}{l} f(n-m) + g(m) \\ 0 < n-m < N, \\ 0 < m < M \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$(f \ominus g)(n) = \min \left\{ \begin{array}{l} f(n+m) - g(m) \\ 0 < n+m < N, \\ 0 < m < M \end{array} \right\} \quad (4)$$

式中:  $f(n) (0 < n < N)$  为采样得到的一维信号函数;  $g(m) (0 < m < M \text{ 且 } M < N)$  为一维结构元素序列;  $N$  为信号数据窗的长度;  $M$  为结构元素的宽度。

形态学梯度算法利用两个不同的结构元素  $g^+$ 、 $g^-$  分别对  $f(n)$  的上、下边沿进行提取,最终得到信号的形态学变换结果  $M(n)$ <sup>[14]</sup>。

$$M^+(n) = (f \oplus g^+)(n) - (f \ominus g^+)(n) \quad (5)$$

$$M^-(n) = (f \ominus g^-)(n) - (f \oplus g^-)(n) \quad (6)$$

$$M(n) = M^+(n) + M^-(n) \quad (7)$$

式中:  $M^+(n)$ 、 $M^-(n)$  分别为利用结构元素  $g^+$ 、 $g^-$  得到的边缘提取结果;宽度为  $l$  的结构元素  $g^+$ 、 $g^-$  如式(8)和式(9)所示。

$$g^+ = \underbrace{\{1, 1, \dots, 1\}}_{2^{-1}(l+1)-1} \underbrace{\{0, 0, \dots, 0\}}_{2^{-1}(l+1)-1} \quad (8)$$

$$g^- = \underbrace{\{0, 0, \dots, 0\}}_{2^{-1}(l+1)-1} \underbrace{\{1, 1, \dots, 1\}}_{2^{-1}(l+1)-1} \quad (9)$$

与离散小波变换类似,通过求取  $M(n)$  的第一个模极大值点可实现对初始电流行波的提取。

### 1.3 两种行波提取方法的比较

离散小波变换和形态学梯度算法均实现对行波

信号的提取。形态学梯度算法仅需加、减运算, 相对于离散小波变换需要更少的处理时间和内存。下面, 通过仿真对两种算法的行波提取能力进行比较。

构建典型的微电网结构如图 1 所示。35 kV 等级的微电网通过公共连接点(PCC)经升压变压器与大电网相连。该微电网既可并网运行, 也可孤岛运行。当联络开关 S1 断开时, 该系统为辐射状微电网; 当 S1 闭合时, 该系统为环状微电网。DG1、DG2 为逆变型分布式电源, DG3 为小型柴油发电机。L1 至 L8 为微电网内的 8 条长度为 10 km 的架空线, 在 PSCAD 仿真软件中通过多个串联的  $\pi$  型等值电路模块来模拟。CT0 至 CT11 为 1 MHz 采样频率的电流互感器, 电流正方向为由母线指向线路。

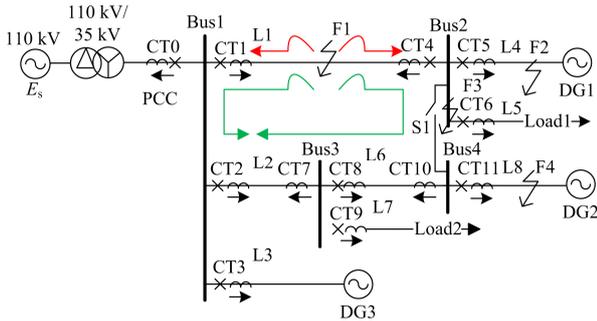


图 1 微电网结构图

Fig. 1 Schematic of the microgrid

以 100 ms 时 F1 点发生三相短路故障为例进行仿真。对线路 L1 首端 CT1 处的三相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  采样并进行新型相模变换<sup>[15]</sup>, 得到一个可良好反映各类型短路故障的模分量  $i_M = i_a + 2i_b - 3i_c$ 。利用 db10 小波对  $i_M$  进行离散小波变换得第 4、5 层小波变换的高频分量分别为  $W_4$ 、 $W_5$ , 其频带分别为 (31.25~62.5) kHz、(15.625~31.25) kHz; 利用宽度为 7 的结构元素对  $i_M$  进行形态学梯度变换得  $M$ 。

$i_M$ 、 $W_4$ 、 $W_5$ 、 $M$  的波形如图 2 所示。

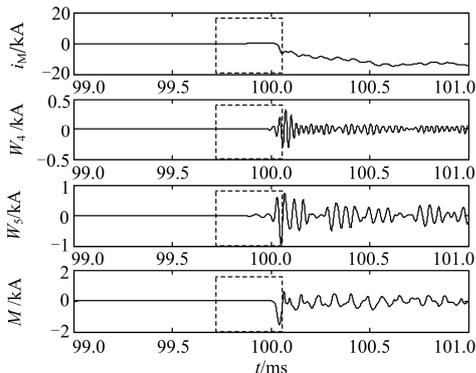


图 2 离散小波变换和形态学梯度变换结果比较

Fig. 2 Comparison of the response of DWT and MG

如图 2 所示, 虚框内为故障后 CT1 处的初始电流行波及其变换结果。通过离散小波变换得到的  $W_4$ 、 $W_5$  在虚框内均含多个极性不同、幅值相近的模极大值, 难以确定哪个模极大值可用来表征该初始行波的极性和幅值。当利用其他的基小波(如 db2、db4、db6、db8)进行小波变换则分析其他层数(频带)的小波变换结果时均会出现相似的情况, 该情况是受离散小波变换的基本原理所限。这说明离散小波变换算法不能较为清晰地提取行波信息。

通过形态学梯度变换得到的  $M$  在虚框内仅含有一个模极大值, 且与  $i_M$  的变化趋势相对应, 即当  $i_M$  存在一个下降沿时  $M$  对应位置存在一个负的模极大值, 反之亦然。这说明形态学梯度算法能够较为清晰地提取行波信息。

综上所述, 形态学梯度算法相较于离散小波变换算法能更为清晰地提取故障电流中的行波信息, 且该算法的计算量较小, 更适用于行波保护。

## 2 行波保护选线方案设计

本文的选线方案均基于对初始电流行波极性的比较, 在电流互感器采样频率足够高的情况下, 分布式电源的控制策略及网络中经多次折反射的电流行波不会影响该方案的正确性。目前基于行波极性比较原理的故障选线方法有基于线路的选线法<sup>[16]</sup>和基于母线的选线法<sup>[17]</sup>, 下面对其进行分析和比较。

### 2.1 基于线路的行波保护选线法

当线路中某点发生故障时, 故障行波由故障点向线路两侧母线传播, 如图 1 中红线所示。当线路内部故障时, 到达线路两侧母线的初始电流行波的极性相同; 当线路外部故障时, 到达线路两侧母线的初始电流行波的极性相反<sup>[16]</sup>。基于该理论可得到基于线路的行波保护选线法判据。

对线路两端的电流互感器  $CT_i (i \in N)$ 、 $CT_j (j \in N)$  处得到的电流模分量  $i_{Mi}$ 、 $i_{Mj}$  进行形态学梯度变换得  $M_{Mi}$ 、 $M_{Mj}$ 。假设  $M_{Mi}$ 、 $M_{Mj}$  的第 1 个模极大值分别为  $R_{Mi}$ 、 $R_{Mj}$ , 则基于线路的选线法判据为: 若  $R_{Mi} \times R_{Mj} > 0$ , 则线路发生区内故障; 若  $R_{Mi} \times R_{Mj} < 0$ , 则线路发生区外故障。

需要注意的是, 当图 1 中的 Bus2 和 Bus4 之间的联络开关 S1 闭合时, 微电网变成环形结构。F1 点故障时, 故障行波在线路中的传播路线如图 1 中红线和绿线所示。此时,  $R_{M1} \times R_{M4} > 0$  和  $R_{M2} \times R_{M7} > 0$  均成立。根据上述判据将判定线路 L1 和 L2 均发生区内故障, 与实际情况不符。这说明基

于线路的选线法在环状和网状微电网中存在局限性,需要研究新型选线判据来弥补该问题。

## 2.2 基于母线的行波保护选线法

微电网中一条母线上通常有三条及以上出线,可通过比较各出线上的初始电流行波极性来选线。

当母线故障时,到达母线所有出线的初始电流行波极性相同;当母线某出线故障时,出线上的初始电流行波极性不全相同,故障线路上的行波极性不同于非故障线路<sup>[17]</sup>。当母线或线路故障时,行波在各出线上的传播方向如图3所示。基于该理论可构造出基于母线的行波保护选线法判据。

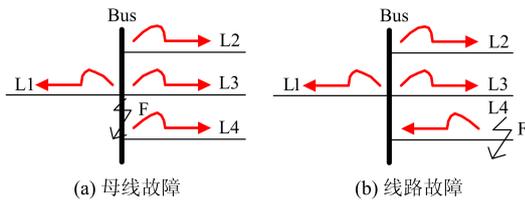


图3 电流行波传播方向示意图

Fig. 3 Diagram of the direction of current traveling waves

假设某根母线有  $n$  ( $n \geq 3$ ) 条出线,其中第  $i$  条出线处的初始电流行波模极大值为  $P_{M_i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 则基于母线的选线法的判据为: 若存在一  $P_{M_j}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 使得对所有  $P_{M_i}$  ( $i \neq j$ ),  $P_{M_i} \times P_{M_j} < 0$  均成立, 则判断为故障发生在母线的第  $j$  条出线方向; 若所有的  $P_{M_i}$  和  $P_{M_j}$  ( $i \neq j$ ) 均满足  $P_{M_i} \times P_{M_j} > 0$ , 则判断为该母线故障。

需要注意的是,基于母线的选线法在不进行多母线通信的情况下各母线仅可判断出故障方向,并不能确定故障线路。例如 F1 点故障时, Bus1 处仅能判断出故障发生在 CT1 方向, L1 及其下游线路 (L4、L5) 均被 Bus1 判断为可能发生故障的线路。

## 2.3 行波保护选线方案设计

上述两种选线法各有利弊。基于线路的选线法在环状、网状微电网中可能误判故障线路; 基于母线的选线法在无多母线通信时仅可判断故障方向,且在仅含两条出线的特殊母线处不适用。本文将两种选线法结合设计出完整的选线方案,内容如下。

1) 对于含有三条及以上出线的母线,在母线处采用基于母线的选线法: 若母线故障或系统末端线路(如图1中 L3、L4)故障,在无多母线通信的情况下即可确定故障线路或母线; 若相邻母线之间的连接线路(如 L1、L2)故障,则需要通过该选线法确定各母线处的故障方向并借助通信传递相邻母线之间的故障方向信息,从而确定故障线路。

2) 对于仅含有两条出线的特殊母线(如 Bus4),需要在该母线处综合运用两种选线法。下面以 Bus4 为例对该方案的具体步骤进行说明。

Step1: 通过 Bus4 两条出线上的初始电流行波极性来判断是否为该母线故障。当  $R_{M10} \times R_{M11} > 0$  时,判断为 Bus4 故障; 否则进行 Step2。

Step2: 借助通信获取 Bus4 上游母线 Bus3 处的故障方向信息。当 Bus3 处判断故障在 CT8 方向时,确定故障发生在 L6 或 L8, 并进行 Step3; 否则判断故障位置与 Bus4 无直接联系。

Step3: 基于线路的选线法,通过 Bus3 和 Bus4 的连接线路 L6 两端的初始电流行波极性判断是否为该线路故障。当  $R_{M8} \times R_{M10} > 0$  时,判断为 L6 故障; 否则判断为线路 L8 故障。

该行波保护选线方案充分发挥了两种选线法的优势,能够实现微电网内不同类型线路的故障选线,在辐射状、环状和网状微电网中均适用。

## 3 故障类型判断及故障选相

### 3.1 单相接地故障初始电流行波分析

利用初始电流行波不仅可实现故障选线,还可以实现故障类型判断及选相,为故障切除和线路修复提供依据。故障发生的初始阶段,初始电流行波还未受非线性电力电子器件控制策略和折反射问题的影响,可用故障分量法对行波进行分析。当 A 相发生金属性接地故障时,三相初始电流行波  $i_{af}$ 、 $i_{bf}$ 、 $i_{cf}$  满足式(10)。

$$\begin{cases} u_{af} + u_{af} = 0 \\ i_{bf} = i_{cf} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $u_{af}$  为 A 相初始电压行波;  $u_{af}$  为故障前一刻的故障点 A 相电压。

根据凯伦贝尔变换和模域欧姆定律<sup>[10]</sup>可得初始零模、线模电流行波  $i_{0f}$ 、 $i_{af}$ 、 $i_{bf}$  和零模、线模波阻抗  $z_0$ 、 $z_1$  以及故障前一刻的电压的关系为

$$i_{0f} = i_{af} = i_{bf} = -\frac{1}{z_0 + 2z_1} u_{af} \quad (11)$$

线路上线模行波速度  $v_1$  大于零模行波速度  $v_0$ 。当电流互感器采样频率足够高时,母线处测得的三相初始行波电流中仅含线模量。通过凯伦贝尔逆变换由式(11)得三相初始电流行波的关系为

$$i_{af} = -2i_{bf} = -2i_{cf} = -\frac{2}{z_0 + 2z_1} u_{af} \quad (12)$$

当线路发生 B 相或 C 相接地故障时,故障相和非故障相初始电流行波满足类似的关系式。线路发生单相接地故障时,则故障相初始电流行波  $i_{f1}$  和

非故障相初始电流行波  $i_{F2}$ 、 $i_{F3}$  满足:

$$i_{F1} : i_{F2} : i_{F3} = -2 : 1 : 1 \quad (13)$$

式(13)为故障支路上初始电流行波满足的关系式, 根据基尔霍夫定律可知, 线路上测得的电流与故障支路上的各相初始电流行波成比例关系<sup>[18]</sup>, 所以线路上测得的初始电流行波同样满足式(13)所述的相对关系。同理, 下文中分析所得的故障支路上三相初始电流行波的相对关系均可应用于线路上。

当故障点距离母线较近或者电流互感器的采样频率较低时, 母线处测得的初始电流行波中同时含有线模量和零模量,  $i_{F1} : i_{F2} : i_{F3} = 1 : 0 : 0$ , 式(13)不成立。下面, 计及零模、线模初始电流行波混叠的情况对三相初始电流行波的关系进一步分析。

当初始零模、线模电流行波到达保护安装处的时间差小于一个采样间隔时, 零模、线模电流行波将混叠<sup>[18]</sup>。在采样频率  $f_s$  确定时, 造成混叠的故障点与保护安装处之间的临界距离  $D_c$  为

$$D_c = \frac{v_0 v_1}{f_s (v_1 - v_0)} \quad (14)$$

当  $f_s = 1$  MHz 时, 利用表 1 的线路电感电容参数, 根据行波速度计算公式  $v = 1 / \sqrt{LC}$  可求得架空线的零模、线模电流行波混叠临界值  $D_c = 0.4108$  km。当计及线路的频变特性,  $D_c$  在不同频段将呈现不同的数值, 但该特性不影响本文所述的基本规律。

表 1 线路电感电容参数

Table 1 Line parameters of inductance and capacitor

参数	$L_0$ /(mH/km)	$L_1$ /(mH/km)	$C_0$ /( $\mu$ F/km)	$C_1$ /( $\mu$ F/km)
数值	4.124 6	0.933 7	0.007 75	0.012 74

以 105 ms(避开 A 相接地故障的死区)时 L1 上发生 A 相接地故障为例进行仿真分析。当故障点与 CT1 之间的距离  $D$  分别为  $D < D_c$  和  $D > D_c$  时, CT1 处测得的三相初始电流行波的形态学变换结果  $M_{Ma}$ 、 $M_{Mb}$  和  $M_{Mc}$  分别如图 4(a)和图 4(b)所示, 分别满足  $i_{F1} : i_{F2} : i_{F3} = 1 : 0 : 0$  和  $i_{F1} : i_{F2} : i_{F3} = -2 : 1 : 1$ 。

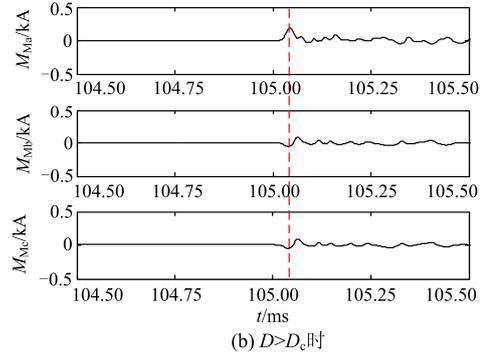
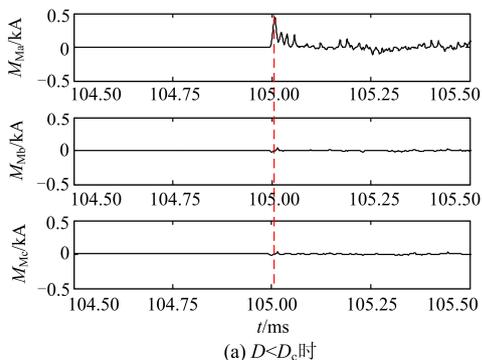


图 4 故障点与母线距离不同时的三相电流行波

Fig. 4 Three-phase current traveling waves at the feeder for different distance between fault and bus

综上所述, 当线路发生单相接地故障时, 计及零模、线模初始行波完全混叠、不完全混叠(中间态)和完全混叠的情况, 故障相初始电流行波  $i_{F1}$  和非故障相初始电流行波  $i_{F2}$ 、 $i_{F3}$  满足式(15)。

$$\begin{cases} i_{F1} \times i_{F2} \leq 0 \\ i_{F1} \times i_{F3} \leq 0 \\ |i_{F2}| = |i_{F3}| \in [0, 0.5] |i_{F1}|, (|i_{F1}| \neq 0) \end{cases} \quad (15)$$

### 3.2 两相相间短路电流初始行波分析

AB 相间发生金属性短路故障时, 初始电压、电流行波满足式(16)。

$$\begin{cases} u_{abf} + u_{abF} = 0 \\ i_{af} = -i_{bf} \\ i_{cf} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $u_{abf}$  为 AB 相间初始电压行波;  $u_{abF}$  为故障前一时刻的故障点 AB 相间电压。

由式(16)可推出零模、线模初始电流行波满足式(17)。

$$\begin{cases} i_{\alpha f} = 2i_{\beta f} = -\frac{u_{abF}}{3Z_1} \\ i_{\alpha f} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

当线路发生 BC 或 AC 相间短路故障时情况类似。由此可知, 两相相间短路故障时零模电流行波始终为 0, 不存在零模、线模混叠现象。故障相初始电流行波  $i_{F1}$ 、 $i_{F2}$  和非故障相初始电流行波  $i_{F3}$  满足式(18)。

$$i_{F1} : i_{F2} : i_{F3} = 1 : -1 : 0 \quad (18)$$

### 3.3 两相接地及三相短路故障初始电流行波分析

同理, 根据两相接地及三相短路故障的边界条件可得电流初始行波与故障前一时刻三相电压  $u_{af}$ 、 $u_{bf}$ 、 $u_{cf}$  的关系如表 2 所示。由表 2 可知, 当线路发生两相接地故障时, 零模电流行波  $i_{\alpha f} \neq 0$ ; 当线路发生三相短路故障时,  $i_{\alpha f} = 0$ 。

表 2 两相接地及三相短路故障时的初始电流行波

Table 2 Initial current traveling waves for a two-phase earthing fault or a three-phase short fault

故障类型	仅含线模量的三相 初始电流行波/kA	包含线模和零模量的 三相初始电流行波/kA	零模电流行波/kA
AB 接地	$\begin{cases} i_{af} = \frac{-2u_{af} - u_{bf} + u_{cf}}{6z_0} + \frac{-u_{af} + u_{bf}}{2z_1} \\ i_{bf} = \frac{-2u_{af} - u_{bf} + u_{cf}}{6z_0} + \frac{u_{af} - u_{bf}}{2z_1} \\ i_{cf} = \frac{2u_{af} + u_{bf}}{3z_0} \end{cases}$	$\begin{cases} i_{af} = \frac{-2u_{af} - u_{bf} + u_{cf}}{2z_0} + \frac{-u_{af} + u_{bf}}{2z_1} \\ i_{bf} = \frac{-2u_{af} - u_{bf} + u_{cf}}{2z_0} + \frac{u_{af} - u_{bf}}{2z_1} \\ i_{cf} = 0 \end{cases}$	$i_{0f} = \frac{-2u_{af} - u_{bf}}{3z_0}$
BC 接地	$\begin{cases} i_{af} = \frac{2u_{bf} + u_{cf}}{3z_0} \\ i_{bf} = \frac{-2u_{bf} - u_{cf} + u_{af}}{6z_0} + \frac{-u_{bf} + u_{cf}}{2z_1} \\ i_{cf} = \frac{-2u_{bf} - u_{cf} + u_{af}}{6z_0} + \frac{u_{bf} - u_{cf}}{2z_1} \end{cases}$	$\begin{cases} i_{af} = 0 \\ i_{bf} = \frac{-2u_{bf} - u_{cf} + u_{af}}{2z_0} + \frac{-u_{bf} + u_{cf}}{2z_1} \\ i_{cf} = \frac{-2u_{bf} - u_{cf} + u_{af}}{2z_0} + \frac{u_{bf} - u_{cf}}{2z_1} \end{cases}$	$i_{0f} = \frac{-2u_{bf} - u_{cf}}{3z_0}$
AC 接地	$\begin{cases} i_{af} = \frac{-2u_{af} - u_{cf} + u_{bf}}{6z_0} + \frac{-u_{af} + u_{cf}}{2z_1} \\ i_{bf} = \frac{2u_{af} + u_{cf}}{3z_0} \\ i_{cf} = \frac{-2u_{af} - u_{cf} + u_{bf}}{6z_0} + \frac{u_{af} - u_{cf}}{2z_1} \end{cases}$	$\begin{cases} i_{af} = \frac{-2u_{af} - u_{cf} + u_{bf}}{2z_0} + \frac{-u_{af} + u_{cf}}{2z_1} \\ i_{bf} = 0 \\ i_{cf} = \frac{-2u_{af} - u_{cf} + u_{bf}}{2z_0} + \frac{u_{af} - u_{cf}}{2z_1} \end{cases}$	$i_{0f} = \frac{-2u_{bf} - u_{cf}}{3z_0}$
三相短路	$\begin{cases} i_{af} = \frac{-2u_{af} + u_{bf} + u_{cf}}{3z_1} \\ i_{bf} = \frac{u_{af} - 2u_{bf} + u_{cf}}{3z_1} \\ i_{cf} = \frac{u_{af} + u_{bf} - 2u_{cf}}{3z_1} \end{cases}$	$\begin{cases} i_{af} = \frac{-2u_{af} + u_{bf} + u_{cf}}{3z_1} \\ i_{bf} = \frac{u_{af} - 2u_{bf} + u_{cf}}{3z_1} \\ i_{cf} = \frac{u_{af} + u_{bf} - 2u_{cf}}{3z_1} \end{cases}$	$i_{0f} = 0$

当线路发生两相接地故障时，情况较为复杂，难以根据三相初始电流行波的特征在零模、线模初始电流行波处于完全混叠、不完全混叠(中间态)和完全混叠三种状态时准确地故障选相。所以本文利用零模、线模初始电流行波的关系来选相，其关系如表 3 所示。

表 3 两相接地故障时的零、线模初始电流行波

Table 3 Modal components of initial current traveling waves for a two-phase earthing fault

故障类型	AB 接地故障	BC 接地故障	AC 接地故障
模分量关系	$i_{0f} + i_{af} - 2i_{bf} = 0$	$i_{0f} + i_{af} + i_{bf} = 0$	$i_{0f} - 2i_{af} + i_{bf} = 0$

### 3.4 行波保护故障类型判断和选相方案设计

根据上述分析可得到行波保护故障类型判断和选相方案，具体步骤如下。

**Step1:** 判断故障线路的三相初始电流行波是否满足式(15)。若满足，则判断线路发生单相接地故障，其中幅值相同的两相为非故障相，余下的一相为故障相；若不满足，则进行 Step2。

**Step2:** 判断故障线路的三相初始电流行波是否满足式(18)。若满足，则判断线路发生两相相间短路故障，其中幅值为 0 的一相为非故障相，余下

的两相为故障相；若不满足，则进行 Step3。

**Step3:** 判断故障线路是否满足  $i_{0f} = 0$ 。若满足，则判断线路发生三相短路故障；若不满足，则判断线路发生两相接地故障，并进行 Step4。

**Step4:** 当  $i_{0f} + i_{af} - 2i_{bf} = 0$  时判断为 AB 两相接地故障；当  $i_{0f} + i_{af} + i_{bf} = 0$  时判断为 BC 两相接地故障；当  $i_{0f} - 2i_{af} + i_{bf} = 0$  时判断为 AC 两相接地故障。

## 4 行波保护死区问题

当故障前一时刻的三相电压为某些特殊值时，三相电流的模分量  $i_M$  在故障时刻不突变，即初始电流行波满足  $i_{af} + 2i_{bf} - 3i_{cf} = 0$ ，导致无法检测到  $i_M$  的初始行波波头，行波保护将出现动作死区。造成各故障类型下动作死区的三相电压如表 4 所示。由表 4 可知，当线路发生单相接地故障、两相相间短路故障和两相接地故障时均可能出现动作死区。

其中，两相接地故障的动作死区为“假性死区”，即此时  $i_{af} + 2i_{bf} - 3i_{cf} = 0$ ，但三相初始电流行波和零模初始电流行波不为零。所以，可利用零模电流分量  $i_0 = (i_a + i_b + i_c)/3$  构成行波保护的后备，当

无法检测到  $i_M$  的初始行波波头时, 可用  $i_0$  代替其来实现故障的判断和选线。

表 4 各故障类型下的动作死区

Table 4 Action dead zone for different fault types

故障类型	死区	故障类型	死区
A 相接地	$u_{aF} = 0$	AC 相间	$u_{aF} - u_{cF} = 0$
B 相接地	$u_{bF} = 0$	AB 接地	$\frac{-6u_{aF} - 3u_{bF} + u_{aF} - u_{bF}}{2z_0} + \frac{u_{aF} - u_{bF}}{2z_1} = 0$
C 相接地	$u_{cF} = 0$	BC 接地	$\frac{2u_{bF} + u_{cF}}{2z_0} + \frac{-5u_{bF} + u_{cF}}{2z_1} = 0$
AB 相间	$u_{aF} - u_{bF} = 0$	AC 接地	$\frac{2u_{aF} + u_{cF}}{z_0} + \frac{-2u_{aF} + 2u_{cF}}{z_1} = 0$
BC 相间	$u_{bF} - u_{cF} = 0$	三相短路	—

单相接地故障和两相相间短路故障的动作死区, 将导致故障时的三相电流行波及其模分量均为 0。行波保护在这种情况下必然失效。单相接地故障和两相相间短路故障死区范围极小, 但仍应针对该情况设计相应的后备保护, 利用稳态电流实现故障的判断和选线。针对单相接地故障, 可利用零序电流保护作为后备保护; 针对两相相间短路故障, 可利用过电流保护作为后备保护<sup>[19]</sup>。

除上述情况带来的保护死区外, 当故障点距离保护安装处过近或者线路过短时, 可能会因为无法区分初始行波信号和经过折反射的行波信号, 而造成保护不能正确动作。利用表 1 中的线模线路参数在不计频变特性的情况下, 可以计算出 1 MHz 的电流互感器无法区分距离保护安装处约 0.15 km 以内的故障点的初始行波及其反射行波, 即此时故障点的反射行波和初始行波到达保护安装处的时间间隔小于一个采样间隔。由此可知, 当电流互感器的采样频率足够高时, 该保护死区虽然不能完全避免但是极小。已有文献提出将 10 MHz 的电流互感器应用于配电网级别的网络<sup>[8]</sup>, 从而能够进一步减小该动作死区。电流互感器的采样频率越高, 就越利于行波保护在短线路上的应用。

在实际应用中雷电和开关操作带来的高频噪声干扰也可能会影响行波保护的正确动作。快速识别雷击干扰或开关操作干扰对于提高行波保护的可靠性以及促进行波保护实用化具有重要意义。对于雷击干扰, 可利用基波电流相量变化率<sup>[20]</sup>、初始行波到达前后的故障电流分量差值<sup>[21]</sup>、健全相暂态电流能量和故障后电流小波变换模极大值<sup>[22]</sup>来区分普通短路故障和雷击干扰; 对于开关操作带来的高频噪声干扰, 可利用开关操作产生的行波波头瞬时频率小于阻波器的截止频率的特点<sup>[23]</sup>来区分普通短路故障和开关干扰。

## 5 仿真验证

以 PSCAD/EMTDC 为仿真平台, 搭建如图 1 所示的 35 kV 等级微电网。系统中线路均为多个串联  $\pi$  型等值电路模块模拟的 10 km 的架空线, 线模、零模电阻参数为  $R_1 = 0.48 \Omega/\text{km}$ 、 $R_0 = 0.79 \Omega/\text{km}$ , 电感电容参数如表 1 所示。逆变型分布式电源 DG1、DG2 采用 PQ 控制, 额定有功功率为 0.5 MW, 额定无功功率为 0 Mvar; 同步机型分布式电源 DG3 的额定电压为 4 kV, 经升压变压器接入微电网。Load1 功率为 0.5 MW; Load2 功率为 10 MW。

### 5.1 并网和孤岛情况下的故障仿真验证

当微电网内不同位置发生故障时(以 102 ms 时发生三相短路故障为例), 各母线处测得的电流模分量  $i_M$  的初始行波 ( $P_{M_i} (i = 0, 1, \dots, 11)$ ) 构成一个向量  $F_{\text{Bus}n} (n = 1, 2, 3, 4)$ 。其中,  $F_{\text{Bus}1} = (P_{M_0}, P_{M_1}, P_{M_2}, P_{M_3})$ ,  $F_{\text{Bus}2} = (P_{M_4}, P_{M_5}, P_{M_6})$ ,  $F_{\text{Bus}3} = (P_{M_7}, P_{M_8}, P_{M_9})$ ,  $F_{\text{Bus}4} = (P_{M_{10}}, P_{M_{11}})$ 。孤岛情况下, Bus1 仅含三条出线,  $F_{\text{Bus}1}$  可简化为  $(P_{M_1}, P_{M_2}, P_{M_3})$ 。当微电网分别运行在并网和孤岛两种情况下的相关数据分别如表 5 和表 6 所示。

由表 5 和表 6 可知: F1 点故障时, 根据  $F_{\text{Bus}1}$  和  $F_{\text{Bus}2}$  可判断故障点位于 Bus1 的 CT1 方向和 Bus2 的 CT4 方向, 从而确定故障发生在 L1 上; F2 点故障时, 根据  $F_{\text{Bus}2}$  可判断故障点位于 Bus2 的 CT5 方向, 从而确定故障发生在 L4 上; F3 点故障时, 根据  $F_{\text{Bus}2}$  的各出线初始电流行波极性相同可判断故障点位于母线 Bus2 上; F4 点故障时, 根据  $F_{\text{Bus}3}$  可判断故障点位于 Bus3 的 CT9 方向, 再通过比较  $P_{M_8}$  和  $P_{M_{10}}$  的极性 ( $P_{M_8} \times P_{M_{10}} < 0$ ) 判断故障点不在 L6 上, 从而确定故障发生在 L8 上。

表 5 并网情况下的各母线处的模极大值

Table 5 Module maximums of buses in grid-connected mode

母线	F1 点故障	F2 点故障	F3 点故障	F4 点故障
$F_{\text{Bus}1}$	(-0.176 9,	(-0.099 1,	(-0.159 6,	(-0.079 6,
	0.603 4,	0.312 5,	0.521 8,	-0.075 2,
	-0.169 4,	-0.091 7,	-0.152 2,	0.245 0,
	-0.170 7)	-0.093 0)	-0.153 6)	-0.073 6)
$F_{\text{Bus}2}$	(0.053 6,	(-0.227 6,	(-0.534 7,	(0.094 8,
	-0.023 0,	0.531 0,	-0.534 5,	-0.044 8,
	-0.023 0)	-0.227 4)	-0.534 5)	-0.044 8)
	(0.199 8,	(0.109 9,	(0.182 4,	(-0.181 0,
$F_{\text{Bus}3}$	-0.091 4,	-0.052 1,	-0.084 1,	0.392 5,
	-0.091 4)	-0.051 9)	-0.084 0)	-0.176 5)
	(0.085 4,	(0.049 1,	(0.079 3,	(-0.321 7,
	-0.078 1)	-0.046 3)	-0.074 4)	0.375 2)

表 6 孤岛情况下的各母线处的模极大值  
Table 6 Module maximums of buses in island mode

母线	F1 点故障	F2 点故障	F3 点故障	F4 点故障
$F_{Bus1}$	(0.538 6,	(0.274 6,	(0.465 5,	(-0.101 0,
	-0.227 8,	-0.123 7,	-0.204 7,	0.219 1,
	-0.233 7)	-0.129 7)	-0.210 6)	-0.103 5)
$F_{Bus2}$	(0.053 9,	(-0.228 5,	(-0.536 8,	(0.127 0,
	-0.023 1,	0.533 1,	-0.536 7,	-0.059 7,
	-0.023 1)	-0.228 4)	-0.536 7)	-0.059 2)
$F_{Bus3}$	(0.268 4,	(0.150 5,	(0.245 2,	(-0.181 4,
	-0.122 9,	-0.070 3,	-0.113 5,	0.394 1,
	-0.122 8)	-0.066 8)	-0.113 4)	-0.177 2)
$F_{Bus4}$	(0.111 0,	(0.065 7,	(0.106 6,	(-0.323 1,
	-0.107 2)	-0.062 2)	-0.092 9)	0.376 8)

综上所述,当并网或孤岛运行的微电网中不同位置发生短路故障时,第 2 节所述的行波保护选线方案均可正确判断故障位置。

## 5.2 各故障类型下的初始电流行波仿真验证

在 102 ms 时(避开各类型故障的死区)F1 点发生各类型短路故障,CT1 处测得的初始电流行波模极大值如表 7 所示。由表 7 可知,在误差允许的范围内,当微电网发生单相接地故障时,三相初始电流行波满足式(15),且非故障相幅值相同;当发生两相相间短路故障时,三相初始电流行波满足式(18),且非故障相的电流行波为 0;当发生三相短路故障时,零模电流行波  $i_{0f}=0$ 。当发生 AB、BC、AC 两相接地故障时,分别满足  $i_{0f}+i_{af}-2i_{bf}=0$ 、 $i_{0f}+i_{af}+i_{bf}=0$ 、 $i_{0f}-2i_{af}+i_{bf}=0$ 。

综上所述,通过第 3 节所述的故障类型判别方法和选相方法,可以准确判断故障类型并选相。

表 7 各种故障类型下的初始电流行波

Table 7 Initial current traveling waves for all fault types			
故障类型	$i_{af}/kA$	$i_{bf}/kA$	$i_{cf}/kA$
A 相接地	0.027 8	-0.006 7	-0.006 8
B 相接地	0.006 2	-0.045 3	0.005 6
C 相接地	-0.004 0	-0.004 3	0.017 5
AB 相间	0.066 1	-0.070 4	0.000 0
BC 相间	0.000 0	-0.062 4	0.056 4
AC 相间	0.009 3	0.000 0	-0.009 8
故障类型	$i_{af}/kA$	$i_{bf}/kA$	$i_{0f}/kA$
AB 接地	-0.004 8	0.043 9	0.019 7
BC 接地	-0.007 4	0.022 9	-0.022 0
AC 接地	0.012 5	0.009 3	0.006 14
三相短路	0.043 9	0.006 1	0.000 0

## 6 结论

本文为解决微电网中各类型短路故障的选线

选相问题,充分利用三相电流初始行波及其模分量的特性,设计了一个基于形态学梯度算法的完整的行波保护方案。

微电网中的线路较短、分支多,且含有多种分布式电源,给初始电流行波的提取带来了一定的困难。为保证该行波选线选相方案的正确性,需选用采样频率极高的电流互感器。本文将 1 MHz 的电流互感器用于 35 kV 电压等级、线路较长的微电网中,并通过仿真证明了该行波保护方案在微电网中的适用性。配置高频互感器不可避免地造成保护经济成本大幅度提升,但是随着互感器技术的发展和成本的下降,行波保护在微电网中将越来越具有应用前景。为兼顾微电网行波保护的可靠性和经济性,在重要线路、其他保护失效的线路选择性安装行波保护装置并进行位置优化也是微电网行波保护今后的研究重点之一。

## 参考文献

- [1] GOPALAN S A, SREERAM V, IU H H C. A review of coordination strategies and protection schemes for microgrids[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 32(5): 222-228.
- [2] 陈彦翔, 黄景光, 丁婧. 微电网自适应电流保护原理完善及其新算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 22-27.  
CHEN Yanxiang, HUANG Jingguang, DING Jing. Improvement of micro grid adaptive current protection principle and research on its new algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 22-27.
- [3] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 40-44.  
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.
- [4] 黄文焘, 邵能灵, 杨霞. 微网反时限低阻抗保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 105-114.  
HUANG Wentao, TAI Nengling, YANG Xia. Inverse time low-impedance protection scheme for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 105-114.
- [5] XUE S, YANG J, CHEN Y, et al. The applicability of traditional protection methods to lines emanating from VSC-HVDC interconnectors and a novel protection principle[J]. Energies, 2016, 9(6): 400.
- [6] NAJY W K A, ZEINELDIN H H, WEI L W. Optimal protection coordination for microgrids with grid connected and islanded capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1668-1677.
- [7] ABDULWAHID A H, WANG S. A new differential

- protection scheme for microgrid using Hilbert space based power setting and fuzzy decision processes[C] // 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications, June 5-7, 2016, Hefei, China: 6-11.
- [8] 梁睿, 孙式想, 靳征, 等. 单双端行波特征综合考虑的辐射状电网组合测距技术[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1461-1467.  
LIANG Rui, SUN Shixiang, JIN Zheng, et al. Fault location in radial power grid after analyzing characteristics of both single-terminal and double-terminal traveling waves[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(5): 1461-1467.
- [9] 何晓, 雷勇, 周聪聪, 等. 消除零模波速影响的配电网单端行波故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 39-45.  
HE Xiao, LEI Yong, ZHOU Congcong, et al. A single-terminal fault location algorithm in distribution network for eliminating the effect of the velocity of zero-mode traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 39-45.
- [10] DONG X, WANG J, SHI S, et al. Traveling wave based single-phase-to-ground protection method for power distribution system[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2015, 1(2): 75-82.
- [11] 杨萃源, 舒勤. 基于线模行波突变的配电网全架空线路单相接地的多端检测定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 22-28.  
YANG Luoyuan, SHU Qin. A new multiterminal detecting location method of single-phase grounding to the overhead-line for distribution network based on travelling-wave mutation of line-mode[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 22-28.
- [12] 张慧颖. 微电网故障暂态特性及集成保护[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
ZHANG Huiying. Research on micro-grid fault transient characteristics and integrated protection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [13] LI X, DYŠKO A, BURT G M. Traveling wave-based protection scheme for inverter-dominated microgrid using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2211-2218.
- [14] WU Q H, ZHANG J F, ZHANG D J. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.
- [15] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57-60.  
SUN Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 57-60.
- [16] 张举, 张晓东, 林涛. 基于小波变换的行波电流极性比较式方向保护[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 51-54.  
ZHANG Ju, ZHANG Xiaodong, LIN Tao. A directional protection based on traveling wave current polarity comparison using wavelet transform[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 51-54.
- [17] 季晨宇, 袁振海. 基于双树复小波的行波选线选相法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 48-54.  
JI Chenyu, YUAN Zhenhai. Fault line and phase selection based on traveling wave and dual-tree complex wavelet[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 48-54.
- [18] 施慎行, 董新洲. 基于单相电流行波的故障选线原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 13-16.  
SHI Shenxing, DONG Xinzhou. Study of fault line selection using single-phase current traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 13-16.
- [19] 张艳霞. 电力系统保护与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [20] 刘兴茂, 林圣, 李小鹏, 等. 利用基波电流相量变化率识别行波保护中雷击干扰[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 55-61.  
LIU Xingmao, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Apply fundamental current phasor change rate to identify lightning disturbance to travelling wave protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 55-61.
- [21] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中雷电干扰问题的对策[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74-78.  
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou. Effect of lightning on protection based on travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 74-78.
- [22] 郭宁明. 行波故障测距中的雷击识别及定位研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.  
GUO Ningming. Research on identification of lightning stroke and locating position in traveling wave fault location[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008.
- [23] 秦小安. 基于希尔伯特—黄变换的输电线路行波保护方法[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.  
QIN Xiaolan. Traveling waves protection methods using Hilbert-Huang transform for transmission lines[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2008.

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-04-12

作者简介:

薛士敏(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为继电保护; E-mail: xsm@tju.edu.cn

崔焱(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为继电保护. E-mail: wendy384@tju.edu.cn

(编辑 魏小丽)